

灰色預測可變結構控制之並聯單相換流器

Variable Structure Control with Grey Prediction Controlled Parallel-Connected Single-Phase Converters

張恩誌*

En-Chih Chang

*、**義守大學電機工程學系

*Department of Electrical Engineering,
I-Shou University

張富爵†

Fu-Juay Chang

†國立聯合大學電機工程學系

†Department of Electrical Engineering,
National United University

Tel : *+886-7-6577711 Ext. 6642

Fax : *+886-7-6577205

E-mail : *enchihchang@isu.edu.tw

梁從主§

Tsrong-Juu Liang

陳建富§

Jiann-Fuh Chen

§國立成功大學電機工程學系

§Department of Electrical Engineering,
National Cheng Kung University

殷李彭**

Li-Peng Yin

摘要

本論文提出灰色預測可變結構控制之並聯單相換流器的設計。在並聯模組中，穩定的交流輸出電壓與均衡的電流分配，可藉由可變結構控制予以建立。然而，當系統不確定性值被過度估測時，顫動現象存在於可變結構控制之滑動面。這可能激發系統未模式化的高頻動態以及危及系統。為了改善顫動，灰色預測被用來估測系統不確定性值的邊界。因此，低失真的弦波輸出電壓可被得到，甚至在非線性負載的狀況下，因為灰色預測可變結構控制提供了優越的性能，諸如快速的動態響應、系統不確定性狀況下具強健性以及顫動的減少。模擬結果驗證了本文提出的控制方法。
關鍵字：並聯單相換流器、可變結構控制、灰色預測、顫動現象。

Abstract

This paper proposes the design of parallel-connected single-phase converters using variable structure control (VSC) with grey prediction (GP). AC output voltage regulation and balanced current-sharing among the parallel modules is achieved by means of VSC. But, the chattering phenomenon around the sliding surface exists when the system uncertainties values are overestimated. This may excite the unmodelled high-frequency dynamics of the system and imperil system. In order to overcome the chattering, grey prediction is used to estimate the system uncertainties boundaries. A low distorted sinusoidal output voltage can be obtained even though at the nonlinear load conditions because VSC with GP provides the excellent performances, such as fast dynamics response, robustness to system uncertainties, and reduced chattering. Simulation results are performed to verify the proposed method.

Keywords : Parallel-connected single-phase converters, variable structure control, Grey prediction, chattering phenomenon.

I. 簡介

單相換流器的並聯控制已經成功地使用在大容量電源供應系統 [1], [2], [3]。並聯架構被使用來使熱管理的設計容易以及改善其穩定性、備用性、模組化與可維護性。為了提供並聯單相換流器適當的運作，電壓控制迴路與電流控制迴路將不可或缺 [4], [5], [6]。電壓控制迴路被設計來得到所要求輸出電壓的振幅與頻率，電流迴路被設計來控制並聯模組的電流分配 [7-9]。一些已出版文獻的研究結果已經使用可變結構控制來解決穩定的輸出電壓 [10-12]。可變結構控制提供了對參數變動的不敏感性，抗拒外部干擾與具有快

速動態響應 [13]。然而，另一方面，由於系統不確定值的被過度估測，在可變結構控制中，顫動現象將會發生。顫動問題可能激發出未模式化的高頻動態與影響系統追蹤性能的精確性。很多種方法已經嘗試用來改善系統的顫動。例如適應性控制器或觀測控制器被試著用來估測系統不確定性值的邊界 [14], [15], [16]；如此的系統不只有艱難的數學模型更有複雜的計算。因此，灰色預測具有簡單的數學與有效率的計算在本文中被使用在可變結構控制中，以用來估測系統不確定性值的邊界 [17], [18], [19]。換句話說，不確定值的上邊界不需要高度精確，以及顫動現象將可以被完全消除。

本論文被組織如下，第二章簡略敘述並聯單相換流器。在第三章，以數學導出灰色預測補償的可變結構控制器。第四章提供模擬結果來驗證所提出的方法之控制性能。最後結論給於第五章。

II. 系統架構介紹

圖 1 顯示並聯單相換流器。為了使理論分析更容易，圖 1 之電路可以等效於圖 2。然後系統動態行為可以如下的微分方程式來表示：

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = r_{L_1} i_{L_1} + L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} + v_o \\ \vdots \\ u_n = r_{L_n} i_{L_n} + L_n \frac{di_{L_n}}{dt} + v_o \\ i_{L_1} + i_{L_2} + \dots + i_{L_n} = i_{c_m} + i_o \\ i_o = \frac{v_o}{R_L} \\ i_{c_m} = C_m \frac{dv_o}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

這裏 $C_m = \sum_{i=1}^n C_i$ 。

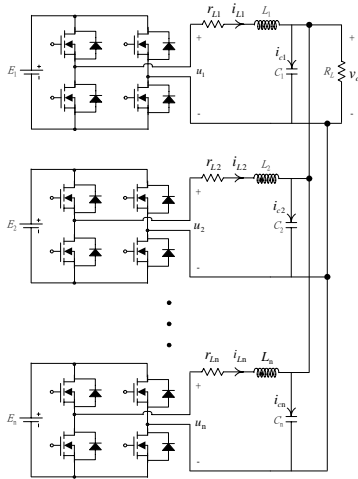


圖 1 並聯單相換流器

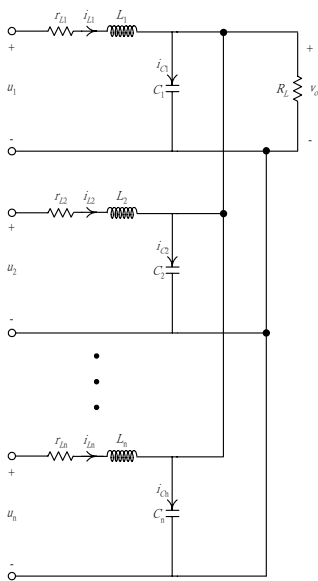


圖 2 等效電路

III. 灰色預測補償的可變結構控制

首先，定義輸出電壓與參考電壓間的電壓狀態誤差 e_v

$$e_v = v_o - v_{ref} \quad (2)$$

這裏 v_o 是輸出電壓以及 $v_{ref} = V_m \sin(\omega t)$ 是參考電壓。

然後，電流狀態誤差 e_i 被定義成每個換流器輸出電流與參考電流之差

$$e_{im} = i_{L_m} - i_{ref} \quad (3)$$

這裏 $i_{L_m} = \frac{n-1}{n}(i_{L_1} + i_{L_2} + \dots + i_{L_n}) = \frac{n-1}{n} \left(\sum_{m=1}^n i_{L_k} \right)$ 是每個換流器的輸出電流以及

$i_{ref} = \frac{1}{n}(i_{L_1} + i_{L_2} + \dots + i_{L_k}) = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n i_{L_k} \right)$ 是參考電流。

為了得到在換流器模組中，穩定的輸出電壓與平衡的電流分配，滑動面被選擇如

$$\begin{aligned} \sigma_m &= k_v e_v + k_m e_{im} + \dot{e}_v \\ &= k_v e_v + k_m e_{im} + \frac{1}{C_m} i_{Cm} \end{aligned} \quad (4)$$

這裏 $k_v > 0$ 以及 $k_i > 0$ 為常數增益。滑動面之方塊圖顯示如圖 3。

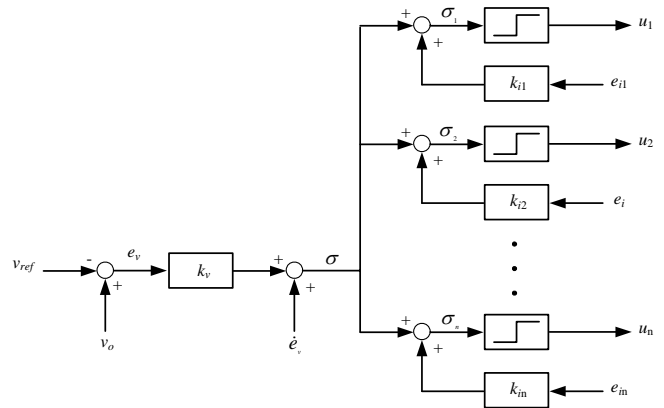


圖 3 滑動面方塊圖

假如滑動運動發生，我們可得到

$$\sigma_m = k_v e_v + k_m e_{im} + \dot{e}_v = 0 \quad (5)$$

然後，等效控制如下

$$\dot{\sigma}_m \Big|_{u=u_{eqm}} = 0 \quad (6)$$

因此，

$$u_{eqm} = \left[\frac{r_{Lm}}{R_L L_m C_m} \cdot v_{ref} + \frac{n}{L_m C_m} \right] \cdot \frac{L_m C_m}{n E_m} + \left(\frac{r_{Lm}}{L_m} + \frac{1}{R_L C_m} \right) \cdot \dot{v}_{ref} + \ddot{v}_{ref} \quad (7)$$

然後， u_{sm} 被要求在系統不確定狀況下保證滑動狀態的存在，亦即

$$\begin{aligned} \lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma \dot{\sigma}_m &\leq 0 \\ &= \sigma \left(k_v \dot{e}_v + k_m \dot{e}_{im} + \frac{1}{C_m} \dot{i}_{Cm} \right) \\ &= \sigma \left\{ \left[\frac{1}{L_m C_m} + \frac{k_{im}}{n} \frac{n-1}{L_m} \right] u_{sm} - \left[\frac{k_m}{n} \sum_{k=1, k \neq m}^n \frac{1}{L_k} u_{sk} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{R_L C_m \Omega_{v_m}} v_o + \frac{1}{C_m \Omega_{i_m}} i_{L_m} - \frac{k_{im}}{n \Delta L_r} \Delta v_r \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

這裏

$$\frac{1}{\Omega_{u_m}} = \left[k_v + \frac{R_L}{L_m} - \frac{1}{R_L C_m} - \frac{k_{im} R_L C_m}{n \Delta L_o} \right]$$

$$\frac{1}{\Delta L_o} = \sum_{k=1, k \neq m}^n \frac{1}{L_m} - \frac{n-1}{L_m}$$

$$\frac{\Delta v_r}{\Delta L_r} = \sum_{k=1, k \neq m}^n \frac{1}{L_m} (r_{Lk} i_{Lk}) - \frac{n-1}{L_m} (r_{Lm} i_{Lm})$$

因此，滿足式(8)的狀態被決定如下：

$$\left\{ \left(\frac{1}{L_m C_m} + \frac{k_{im} n - 1}{n L_m} \right) E_m > \left(\frac{k_m}{n} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{1}{L_k} u_{sk} + \frac{1}{R_L C_m \Omega_{v_m}} v_o + \frac{1}{C_m \Omega_{i_m}} i_{L_m} - \frac{k_{im}}{n \Delta L_r} \Delta v_r \right) \right\}, \text{ if } \sigma_m < 0 \quad (9)$$

$$\left\{ \left(\frac{1}{L_m C_m} + \frac{k_{im} n - 1}{n L_m} \right) E_m < \left(\frac{k_m}{n} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{1}{L_k} u_{sk} + \frac{1}{R_L C_m \Omega_{v_m}} v_o + \frac{1}{C_m \Omega_{i_m}} i_{L_m} - \frac{k_{im}}{n \Delta L_r} \Delta v_r \right) \right\}, \text{ if } \sigma_m > 0 \quad (10)$$

接著，式(9)與式(10)之函數 u_{sm} 可被重寫成

$$u_{sm} = K_1 \text{sign}(\sigma_m) \quad (11)$$

這裏 K_1 是一個常數，需滿足下面的方程式

$$K_1 > \max \left\{ \frac{\left(\frac{k_m}{n} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n \frac{1}{L_k} u_{sk} + \frac{1}{R_L C_m \Omega_{v_m}} v_o + \frac{1}{C_m \Omega_{i_m}} i_{L_m} - \frac{k_{im}}{n \Delta L_r} \Delta v_r \right)}{\left(\frac{1}{L_m C_m} + \frac{k_{im} n - 1}{n L_m} \right)} \right\} \quad (12)$$

3.1 灰色預測

灰色預測模型使用的程序被敘述如下：

- i) 首先，假設 $x^{(0)}$ 為原始資料序列，表示為 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ (13)

這裏 n 是資料數目。

- ii) 然後，累加生成運算(AGO)為

$$x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

- iii) 基於累加的資料序列 $x^{(1)}$ ，一階微分灰色模型被建構如同

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (15)$$

這裏 a 與 b 是模型因數，需要被決定。

- iv) 讓 $z^{(1)}$ 成為資料序列，藉由下面 $x^{(1)}$ 之均值生成，可得

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)], \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

因此，我們可以將式(16)表示成離散序列

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

然後 a 與 b 可以由最小平方法來求解

$$\Theta = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (18)$$

這裏

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

- v) 將 a 與 b 的值代入式(17)，預測輸出可被計算如

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (19)$$

- vi) 因此，使用式(19)的反 AGO，預測輸出在 $(k+1)$ 時，將可被估測如同

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a) \cdot [x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} \quad (20)$$

3.2 灰色預測補償的可變結構控制

假如系統不確定性值超出最大預測的邊界，系統將失去強健性。因此，使用灰色預測模型估測的滑動函數，將被用來消除顫動現象。現在，傳統的控制輸入被重新定義為

$$u = u_{eqm} + u_{sm} + u_{gem} \quad (21)$$

這裏 u_{eqm} 是等效控制， u_{sm} 是不確定性控制輸入。 u_{gem} 為灰色預測控制輸入，被設計來消除顫動。

$$u_{gem} = \begin{cases} 0, & |\hat{\sigma}_m| \geq \Phi \\ K_2 \hat{\sigma}_m \text{sign}(\sigma_m \hat{\sigma}_m), & |\hat{\sigma}_m| < \Phi \end{cases} \quad (22)$$

這裏 K_2 是一常數以及 Φ 是系統邊界。

證明：灰色模型補償的可變結構控制器保證系統穩定性如下：

首先，定義一 Lyapunov 函數

$$V = \frac{1}{2} \sigma \sigma^2 \quad (23)$$

然後從 Lyapunov 定理，穩定性被確保如同

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} \quad (24)$$

因此，當 $t \rightarrow \infty$ 時， $V \rightarrow 0$ ，亦即漸進穩定被滿足。

IV. 模擬結果

提出的系統使用三組全橋單相換流器並聯來做測試，參數如下：

$$E_1 = E_2 = E_3 = 200V \quad ; \quad L_1 \cong L_2 \cong L_3 \cong 4mH \quad ; \\ C_1 = 70\mu F \quad ; \quad r_1 \cong r_2 \cong r_3 \cong 0.1\Omega \quad ; \quad R_L = 10\Omega \quad ; \quad \text{輸出電壓 } V_o = 110 V_{rms}, 60 \text{ Hz}.$$

圖 4 與圖 5 分別顯示提出的方法與傳統 VSC 輸出電壓在負載突然變化從無載到額定負載於 90 度觸發角的動態行為。由圖中可看出，使用所提出的方法的電壓降比傳統 VSC 還要小。圖 6，圖 7 以及圖 8 顯示提出的方法在換流器模組中建立相等的電流分配。相反地，使用傳統 VSC 之輸出電流顯示於圖 9，圖 10 與圖 11，電流沒有平均分配。最後，提出的方法與傳統 VSC 之相位平面個別繪於圖 12 與圖 13。其動態軌跡由於負載的突然變化而遠離原點。其中可觀察到的是，傳統 VSC 動態軌跡會來回穿越滑動面形成顫動現象，然後再朝向原點前進。很明顯地，所提出的方法不只消除了顫動現象也改善了動態響應。

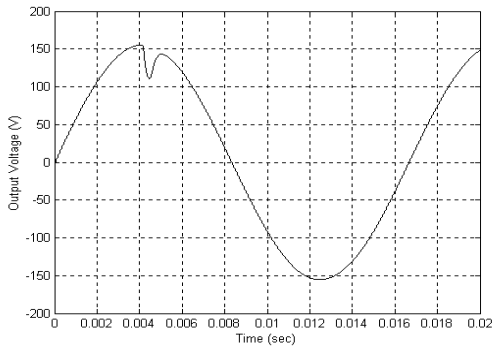


圖 4 所提出的方法之輸出電壓在負載突然變化於 90 度觸發角

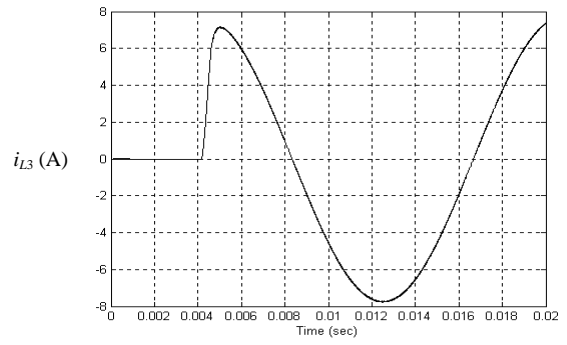


圖 8 提出的方法之輸出電流 i_{L_3}

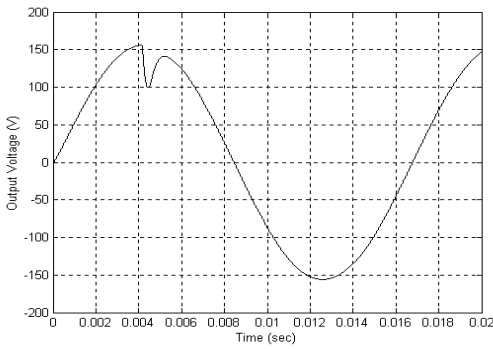


圖 5 傳統 VSC 之輸出電壓在負載突然變化於 90 度觸發角

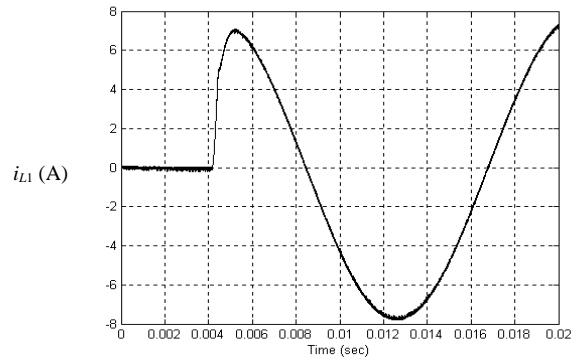


圖 9 傳統 VSC 之輸出電流 i_{L_1}

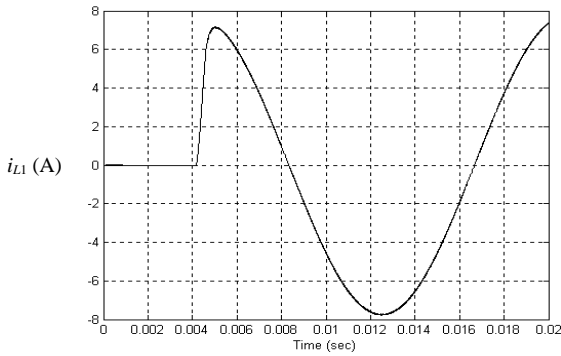


圖 6 提出的方法之輸出電流 i_{L_1}

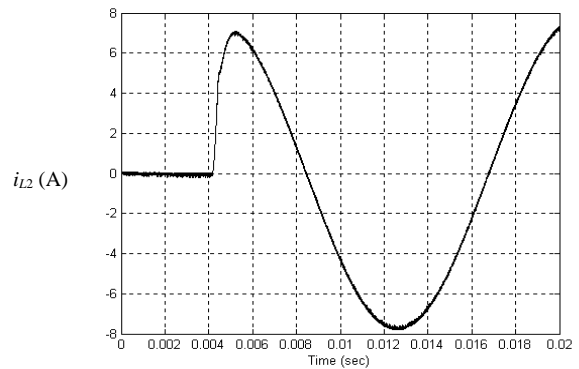


圖 10 傳統 VSC 之輸出電流 i_{L_2}

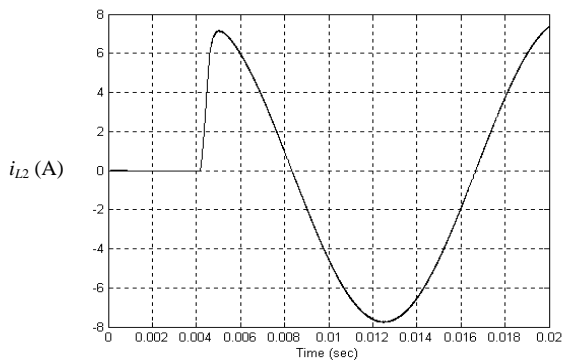


圖 7 提出的方法之輸出電流 i_{L_2}

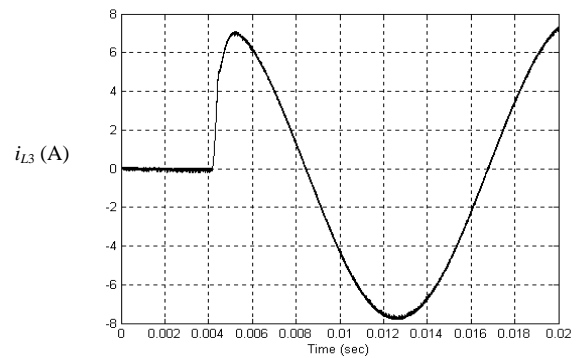


圖 11 傳統 VSC 之輸出電流 i_{L_3}

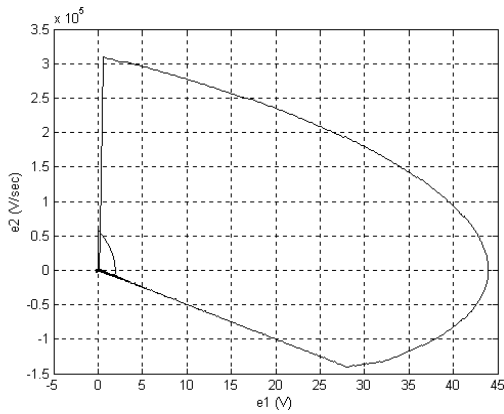


圖 12 提出方法之相位平面

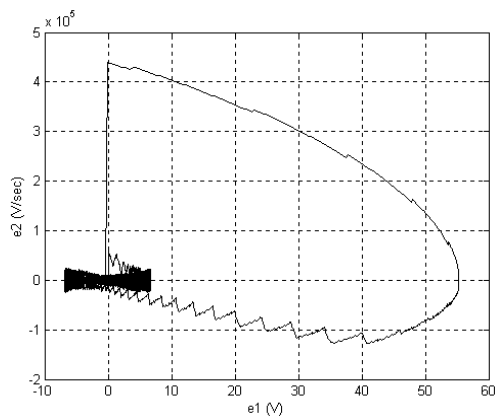


圖 13 傳統 VSC 之相位平面

V. 結論

本篇論文的主要目標是要得到換流器並聯模組之穩定輸出電壓與同時控制其電流均衡分配。雖然這些可由可變結構控制來達成，然而顫動現象會在可變結構控制中產生。因此，灰色預測模型被使用來消除顫動現象。使得系統的性能被更進一步由灰色預測模型而獲得改善。最後，優越的動態響應與系統在不確定性狀況下的強健性藉由模擬得以驗證。

誌謝

本文之研究承行政院國家科學委員會編號 NSC-99-2218-E-214-002 計畫支持研究經費，謹此誌謝。

參考文獻

- [1] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 29, no. 1, pp. 136-143, Jan.-Feb., 1993.
- [2] T. Kawabata, N. Sashida, Y. Yamamoto, K. Ogasawara, and Y. Yamasaki, "Parallel processing inverter system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 422-450, July 1991.
- [3] J. F. Chen, and C. L. Chu, "Combination voltage-controlled and current-control PWM inverter for UPS parallel operation," *IEEE Trans.* vol. 10, no. 5, pp. 547-558, Sept., 1995.
- [4] T. Ninomiya, and R. H. Wu, "Novel control strategy for parallel operation of power supply modules," *IEEE PCC'93*, April., 1993, pp. 159-164.
- [5] M. Carpita, and M. Marchesoni, "Experimental study of a power

- conditioning system using sliding mode control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, no. 5, pp. 731-742, Sept., 1996.
- [6] C. C. Hua, "Two-level switching pattern deadbeat DSP controlled PWM inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 10, no. 3, pp. 310-317, 1995.
- [7] K. Zhang, and Y. Kang, J. Xiong, and J. Chen, "Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp.271-280, 1995.
- [8] S. L. Jung, L. H. Ho, Yeh, H. C., and Y. Y. Tzou, "DSP-based digital control of a PWM inverter for sine wave tracking by optimal state feedback technique," in *Proc. IEEE PESC'94*, 1994, vol. 1, pp. 546-551.
- [9] A. Kawamura, and R. G. Hofst, "Instantaneous feedback controlled PWM inverter with adaptive hysteresis," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 20, no. 4, pp. 769-775, 1984.
- [10] L. Malesani, L. Rossetto, G. Spiazzi, and A. Zuccato, "An ac power supply with sliding-mode control," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1993, pp. 623-629.
- [11] C. Y. Chan, "Servo-system with discrete-variable structure control," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 321-325, 1991.
- [12] T. L. Chern, J. Chang, C. H. Chen, and H. T. Su, "Microprocessor-based modified integral discrete variable-structure control for UPS," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, pp. 340-348, 1999.
- [13] K. D. Young, V. I. Utkin, and U. Ozguner, "A control engineer's guide to sliding mode control," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 7, pp. 328-342, 1999.
- [14] J. U. Lee, J. Y. Yoo, and G. T. Park, "Current control of a PWM inverter using sliding mode control and adaptive parameter estimation," in *Proc. IEEE IECON'94*, 1994, vol. 1, pp. 372-377.
- [15] T. Yokoama, and A. Kawamura, "Disturbance observer based fully digital controlled PWM inverter for cvcf operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 5, pp.473-480, 1994.
- [16] T. Senjyu, H. Kamifurutono, and K. Uezato, "Robust current control method with a disturbance voltage observer for a voltage source PWM inverter," *Int. J. Electron.*, vol. 80, no. 2, pp. 365-375, 1996.
- [17] J. L. Deng, "Introduction to grey system theory," *J. Grey Syst.*, vol. 1, pp. 1-24, 1989.
- [18] J. L. Deng, "Control problems of grey system," *Syst. and Contr. Lett.*, vol. 5, pp. 288-294, 1982.
- [19] H. C. Lu, "Grey prediction approach for designing grey sliding mode controller," in *Proc. Conf. IEEE Syst., Man, and Cybern.*, 2004, vol. 1, pp. 403-408.